

# 利用凸晶摄谱仪获取 Z 箍缩等离子体 X 辐射单色图像\*

叶 凡<sup>1)2)</sup> 薛飞彪<sup>1)</sup> 郭 存<sup>1)</sup> 李正宏<sup>1)</sup>  
杨建伦<sup>1)</sup> 徐荣昆<sup>1)</sup> 章法强<sup>1)</sup> 金永杰<sup>2)</sup>

1) 核物理与化学研究所 绵阳 621900)

2) 清华大学工程物理系 北京 100084)

(2007 年 5 月 7 日收到, 2007 年 6 月 18 日收到修改稿)

考虑晶体摇摆曲线的影响, 用光线追迹方法讨论了凸晶摄谱仪的能谱分辨率、单色图像径向空间分辨本领以及晶体与 X 射线源之间的距离对它们的影响. 根据讨论建立了云母凸晶摄谱仪, 在“强光一号”装置上对系统进行了成功地测试, 获得铝丝阵负载 Z 箍缩等离子体 X 辐射单色图像. 时间积分图像表明, Z 箍缩 Al 等离子体 K 壳层  $Ly\alpha$  和  $He\beta$  线辐射来自等离子体核心直径约 2.3 mm 的区域.

关键词: 单色图像, 摄谱仪, 光线追迹

PACC: 5270L, 3320R, 4215D

## 1. 引 言

凸晶摄谱仪能够在单次实验中测量较大范围的 X 射线能谱, 是高亮度脉冲 X 射线源一种有力的能谱分析工具, 被广泛用于箍缩等离子体<sup>[1,2]</sup>, 放电等离子体<sup>[3]</sup>和激光等离子体<sup>[4,5]</sup>的 X 射线能谱诊断. 为研究系统能谱诊断能力, Kastner<sup>[6]</sup>阐述了凸晶摄谱仪的光线追迹方法, 文献 [7] 借鉴这种方法对一种 RbAP 凸晶摄谱仪进行了分析. 通常, 光源沿色散方向的空间尺度展宽会降低摄谱仪的能谱分辨率, 但这种机理可以用来获取等离子体 X 辐射单色图像, 为研究等离子体参数空间分布、校验理论模拟程序提供重要信息<sup>[8]</sup>. 为获得 X 辐射单色图像, 必须综合考虑系统的能谱和空间分辨本领. 本文利用光线追迹方法<sup>[7]</sup>讨论摄谱仪的能谱分辨率、单色成像径向空间分辨本领以及晶体与 X 射线源之间的距离对它们的影响. 根据讨论建立了一套云母凸晶摄谱仪, 在“强光一号”装置上进行了铝丝阵负载 Z 箍缩实验, 获得了等离子体 K 壳层 X 线辐射单色图像.

## 2. 光线追迹计算

### 2.1. 光线追迹方法

光线追迹坐标系如图 1 所示. 坐标原点位于凸晶曲率中心, 晶体曲率半径为  $r$ . X 射线源上任意点  $(m, n)$  发出的 X 射线到达晶体表面上一点  $(u, v)$ , 形成的掠射角为  $\theta_1$ , 衍射线方向与入射 X 射线波长  $\lambda$  满足 Bragg 方程  $2d\sin\theta_1 = k\lambda$ ,  $k$  为衍射阶次. 衍射图像与记录介质所在圆的交点为  $(x, y)$ . 记录介质置于圆心为  $(p, q)$ , 半径为  $R$  的圆周上. X 射线源和晶体之间与  $y$  轴平行的狭缝可以实现  $z$  方向空间分辨, 同时保证  $y$  方向任意位置处光源能够发生衍射, 建立单色图像.

利用图 1 中各变量的几何关系可得

$$u = -r\sin\theta_2, \quad (1)$$

$$v = r\cos\theta_2, \quad (2)$$

$$\tan\theta_3 = \frac{v-n}{u-m}. \quad (3)$$

引入参量  $t$  ( $t > 0$ ), 由  $(u, v)$  和  $(x, y)$  两点确定的直线可以表示为

\* 国家自然科学基金(批准号: 10035030)资助的课题.

$$\begin{aligned} x &= u + t \cos(\theta_1 + \theta_2), \\ y &= v + t \sin(\theta_1 + \theta_2). \end{aligned} \quad (4)$$

$(x, y)$  是该直线与记录介质圆的交点 故

$$(x - p)^2 + (y - q)^2 = R^2. \quad (5)$$

利用(4)和(5)式,解得满足  $t > 0$  的方程根为

$$\begin{aligned} t &= -(\beta \cos \alpha + \gamma \sin \alpha) \\ &+ \sqrt{(\beta \cos \alpha + \gamma \sin \alpha)^2 + (R^2 - \beta^2 - \gamma^2)}. \end{aligned} \quad (6)$$

其中  $\alpha = \theta_1 + \theta_2, \beta = u - p, \gamma = v - q.$

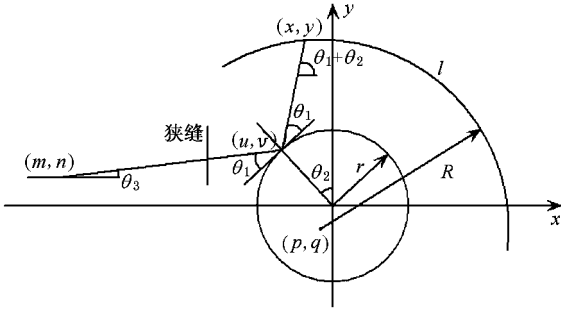


图 1 凸晶摄谱仪光线追迹坐标系

对特定波长的入射 X 射线,联合(3)式和 Bragg 条件用牛顿迭代法可以求出  $\theta_2$ . 因此,利用(1)—(4)式解得  $(x, y)$ ,该波长入射 X 射线图像的位置  $l$  计算为

$$l = R \cdot (\pi/3 + \theta_4), \quad (7)$$

式中,  $\theta_4 = \tan^{-1} \left[ \frac{-(x - p)}{y - q} \right]$ ,  $\pi/3$  是根据基准点的选择确定的.显然,  $l = f(\theta_2, m, n, p, q, r, R)$  是系统几何参量的函数.

### 2.2. 能谱分辨率

X 射线源有限径向空间尺寸和晶体摇摆曲线导致摄谱仪能谱分辨率降低.首先计算有限尺寸 X 射线源在记录介质上引起的光强分布.由于摇摆曲线的影响,考虑  $\theta'_2 = \theta_2 + \delta\theta_2$  时的衍射,位置  $(m, n)$  处的微元  $\delta n$  在记录介质上  $l = f(\theta'_2, m, n, p, q, r, R)$  处产生的强度分布为

$$\delta i = i_0 \alpha(\theta' - \theta) \delta n, \quad (8)$$

其中,  $i_0$  是此微元辐射 X 射线强度,  $\sigma$  是晶体的衍射效率函数,  $\theta$  是 Bragg 角,  $\theta'$  是  $\theta'_2$  对应的掠射角,

$\theta' = (\theta_2 + \delta\theta_2) - \tan^{-1} \left( \frac{r \cos(\theta_2 + \delta\theta_2) - n}{-r \sin(\theta_2 + \delta\theta_2) - m} \right)$  根据晶体衍射动力学理论<sup>[9]</sup> 推导  $\sigma$  表达式为

$$\alpha(\alpha) = \frac{R_1 \cdot (\omega/2\pi)}{\alpha^2 + (\omega/2)^2},$$

其中,  $R_1$  是积分衍射效率,  $\alpha$  是对 Bragg 角的偏离,  $\omega$  表征摇摆角大小,云母晶体的  $\omega$  数值在文献[9]中给出.取不同的  $\delta\theta_2$ ,得到此微元对记录介质光强分布的贡献.总强度分布为(8)式沿光源直径方向的积分.计算时假设 Z 箍缩等离子体辐射 X 射线强度分布正比  $\sqrt{(D/2)^2 - (n - n_0)^2}$ ,  $D$  是光源直径,  $(m, n_0)$  是 X 射线源中心位置.

能谱分辨率由(9)式定义

$$M = \frac{\lambda}{\delta\lambda}. \quad (9)$$

在记录介质上得到光强分布的半高宽  $\delta l$ ,  $\delta\lambda$  可以表示为

$$\delta\lambda = \frac{\partial\lambda}{\partial l} \cdot \delta l. \quad (10)$$

摄谱仪参数见表 1,  $D = 1.0$  mm 时摄谱仪能谱分辨率计算如图 2.表明,随着晶体与 X 射线源之间距离增大,能谱分辨能力增强.由于谱线展宽因素没有考虑,计算的能谱分辨率偏高.

表 1 用于光线追迹计算的摄谱仪几何参数

晶体 云母	$2d = 1.984$ nm		
$m = -510$ mm	$p = -43$ mm	$r = 80$ mm	
$n_0 = 0$ mm	$q = 50$ mm	$R = 120$ mm	

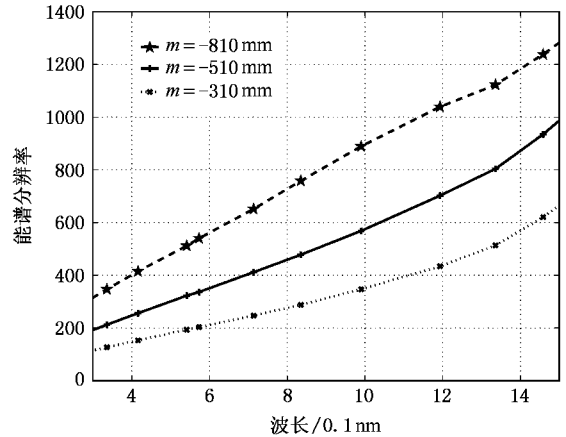


图 2 凸晶摄谱仪的能谱分辨率

### 2.3. 径向空间分辨本领

摄谱仪获取单色图像时一个重要参数是其径向空间分辨本领  $\delta n$ ,它由点 X 射线源( $D = 0$ )在记录介质上引起的图像展宽  $\delta l$  决定,表示为

$$\delta n = \left( \frac{\partial l}{\partial n} \right)^{-1} \cdot \delta l. \quad (11)$$

摄谱仪获取单色图像时径向空间分辨本领见图

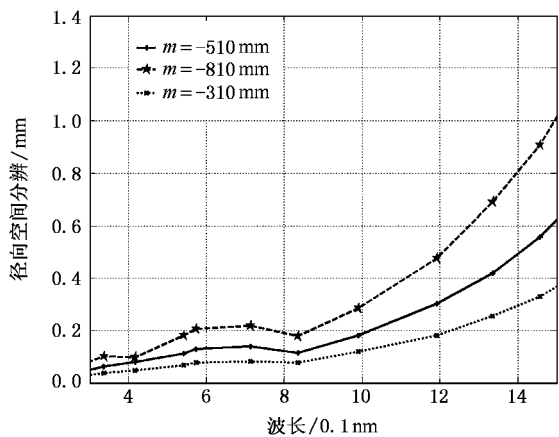


图 3 凸晶摄谱仪的径向空间分辨本领

3 表明,减小晶体与 X 射线源之间的距离能够提高单色图像径向空间分辨本领。

系统其他几何参数如记录介质的位置等对能量分辨率和空间分辨本领的影响很小,且受实验条件约束,这些参数的调节余量有限,本文不作赘述。

### 2.4. 径向放大倍数

图 4 显示了波长为 0.4—1.4 nm 的 X 射线谱线位置  $l$  与光源位置  $n$  的关系,结果表明,在相同波长情况下, $l$  与  $n$  成线性关系,即在记录介质上得到的单色图像是线性缩放的图像,放大倍数等于图中直线的梯度。波长不同,放大倍数略有差异。

## 3. 实验结果

根据上述讨论,凸晶摄谱仪获取 X 辐射单色图像时必须在能谱分辨率和空间分辨本领之间做出权衡。结合“强光一号”装置靶室布局,加工了云母凸晶

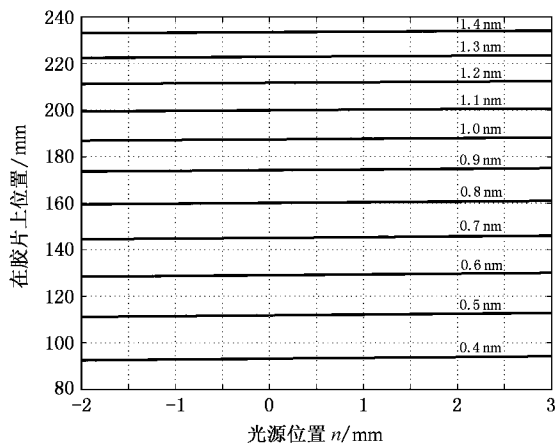


图 4 0.4—1.4 nm X 射线谱线位置  $l$  与光源位置  $n$  的关系

摄谱仪测量铝丝阵负载 Z 箍缩等离子体类氦和类氢 X 线辐射单色图像,系统几何参数与表 1 中数据相同,其能谱和空间分辨能力分别如图 2 和图 3 中实线所示。狭缝宽度为 230  $\mu\text{m}$ ,狭缝距离晶体中心 207 mm。采用 15  $\mu\text{m}$  聚乙烯膜和镀 0.4  $\mu\text{m}$  铝的 2.5  $\mu\text{m}$  厚聚脂薄膜作滤片屏蔽可见光、低能 X 射线散射影响以及等离子体溅射对凸晶分析器的破坏。对铝的 K 壳层  $\text{He}\alpha$ ,  $\text{Ly}\alpha$  和  $\text{He}\beta$  线辐射,系统的能量分辨率约为 440  $\text{\AA}$  和 380,可以实现共振线与互组谱线或者伴线的能谱分辨,空间分辨本领为 133  $\mu\text{m}$ , 124  $\mu\text{m}$  和 115  $\mu\text{m}$ 。

图 5(a)是摄谱仪对直径 8 mm 单层圆柱构形的铝丝阵负载 Z 箍缩等离子体的典型诊断结果,同发次时间积分 X 射线针孔像见图 5(b),针孔直径为 30  $\mu\text{m}$ ,针孔前加 3  $\mu\text{m}$  铝膜屏蔽可见光。从图 5(a)可以清楚地识别铝离子的类氦及类氢 X 线辐射,这些线辐射图像表征了等离子体线辐射的空间分布。单色

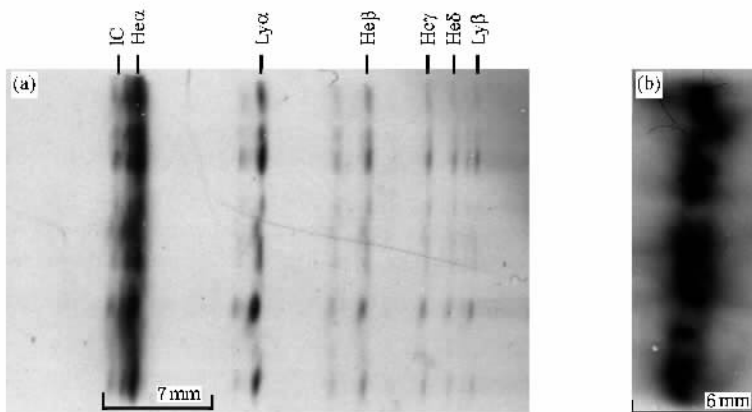


图 5 铝丝阵 Z 箍缩等离子体 X 线辐射图像(a)和时间积分针孔像(b)

图像经处理,  $Ly\alpha$  图像的径向空间尺寸约 0.7 mm, 模拟计算表明, 假设辐射线的 Doppler 宽度为  $3 \times 10^{-4}$  nm 时, 实验条件下谱线展宽和摇摆曲线展宽对图像径向宽度的贡献约是光源径向空间尺度贡献的十分之一, 考虑图像的放大倍数, 其辐射源区直径约为 2.3 mm, 利用  $He\beta$  图像得到一致的结果, 针孔图像显示 X 辐射区域直径约 2.6 mm. 等离子体 R-T 不稳定性的发展引起单色图像在轴向成节状, 且在局部区域造成图像饱和, 这些辐射应该是在箍缩到心时刻来自等离子体核区, 包括等离子体热点. X 射线源径向尺寸为 2.3 mm 时凸晶摄谱仪对  $He\alpha$  谱线的能谱分辨率约为 179, 导致图 5(a) 中  $He\alpha$  和互组合谱线

(IC) 不可分辨.

## 4. 结 论

增大晶体与 X 射线源之间的距离可以提高凸晶摄谱仪的能谱分辨率, 但降低了单色图像径向空间分辨本领. 利用凸晶摄谱仪获取 X 辐射单色图像时必须两者之间做出权衡. “强光一号”装置铝丝阵负载 Z 箍缩实验凸晶摄谱仪时间积分诊断结果显示内爆过程中等离子体 K 壳层  $Ly\alpha$  和  $He\beta$  辐射来自等离子体中心直径约 2.3 mm 区域.

- |  |   |
|--|---|
| [ 1 ] Peacock N J, Speer R J, Hobby M G 1969 <i>J. Phys.</i> B 2 798                                   | [ 6 ] Kastner S O 1979 <i>Appl. Opt.</i> 18 374   |
| [ 2 ] Nash T, Derzon M, Leeper R, Jobe M, Hurst D, Seamen J 1999 <i>Rev. Sci. Instrum.</i> 70 302      | [ 7 ] Yanagidaira T, Shimoda K, Ono Y, Harino K 2000 <i>Rev. Sci. Instrum.</i> 71 88  |
| [ 3 ] Swartz M, Kastner S, Rothe E, Neupert W 1971 <i>J. Phys.</i> B 4 1747                            | [ 8 ] Ochi Y, Fujita K, Niki I, Nishimara H, Izumi N, Sunahara A, Naruo S, Kawamura T, Fukao M, Shiraga H, Takabe H, Mima K, Nakai S, Uschmann I, Butzbach R, Förster E 2000 <i>J. Q. S. R. T.</i> 65 393 |
| [ 4 ] Donaldson T P, Hutcheon R J, Key M H, Urquhart R J 1976 <i>J. Phys.</i> B 6 1525                 | [ 9 ] Henke B L, Gullikson E M, Davis J C 1993 <i>At. Data Nucl. Data Tables.</i> 54 181  |
| [ 5 ] Aglitskii E V, Boiko V A, Vinogradov A V, Yukov E A 1974 <i>Sov. J. Quantum. Electron.</i> 4 322 |   |

# Utilization of convex crystal spectrograph to obtain monochromatic X-ray images of Z-pinch plasmas<sup>\*</sup>

Ye Fan<sup>1,2)</sup> Xue Fei-Biao<sup>1)</sup> Guo Cun<sup>1)</sup> Li Zheng-Hong<sup>1)</sup> Yang Jian-Lun<sup>1)</sup>  
Xu Rong-Kun<sup>1)</sup> Zhang Fa-Qiang<sup>1)</sup> Jin Yong-Jie<sup>2)</sup>

1 *Institute of Nuclear Physics and Chemistry, Mianyang 621900, China*

2 *Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China*

( Received 7 May 2007; revised manuscript received 18 June 2007 )

## Abstract

The spectral resolution, spatial resolution of monochromatic X-ray images of a spectrograph based on convex crystal were discussed by ray tracing calculations taking into consideration the effect of rocking curve of the crystal. A mica convex crystal spectrograph was designed and then tested successfully on “QiangGuang-1” pulsed power facility. Time integrated monochromatic X-ray images of Al Z-pinch plasmas showed the X-ray line emissions of K-shell came from the core region of a diameter of about 2.3 mm.

**Keywords:** X-ray monochromatic image, spectrograph, ray tracing

**PACC:** 5270L, 3320R, 4215D